干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

哈萨克斯坦巴尔喀什湖沉积物粒度特征及其对区域环境变化的响应

贺振杰[1,2,3]，马 龙[1,2,3]，吉力力·阿不都外力[1,2,3]，刘 文[1,2,3]，
Gulnura ISSANOVA[2,4]，Galymzhan SAPAROV[2,5]，黄 坤[1,2,3]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院中亚生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan；5. Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry Named after U. U. Uspanov, Almaty 050060, Kazakhstan）

摘 要：湖泊沉积物中的粒度参数记载了丰富的流域环境变化信息，可为无器测资料地区重建古环境变化序列提供可靠的途径。通过对巴尔喀什湖岩芯沉积物中粒度、磁化率等环境代用指标的分析，结合放射性^{137}Cs定年以及流域气候、湖泊水位等器测记录数据，研究了巴尔喀什湖沉积物中粒度变化特征及其环境指示意义。结果表明：巴尔喀什湖沉积物中黏土质（<4 μm）组分平均含量为20.32%，细粉砂质（4~16 μm）为40.13%，中粉砂质（16~32 μm）为22.86%，粗粉砂质（32~64 μm）为10.55%，砂质（>64 μm）为6.13%。通过粒径标准-偏差法提取了沉积物中环境细颗粒敏感组分（F1，6.61~10.00 μm）和粗颗粒敏感组分（F2，45.71~69.18 μm）。研究表明在人类活动影响不断加强的背景下，粒度敏感组分的含量变化不能敏感的反映湖泊水位、入湖径流乃至区域气候的变化，而与沉积物中磁化率所反映的人类活动强度变化存在较为显著的相关关系（r=0.870，P<0.01），这可能与人类活动增强导致的流域内富含磁性物质的细颗粒碎屑物质被搬运入湖有关，湖泊沉积物中磁化率升高的同时，湖泊沉积物中细颗粒物质增加。研究结果可为长时间尺度下古环境重建研究提供重要参考依据，同时也对揭示流域人类活动对湖泊环境的影响具有一定的科学意义。

关 键 词：哈萨克斯坦；巴尔喀什湖；湖泊沉积物；粒度；环境变化
文章编号：

近百年来中亚干旱区地表过程已受到人类活动的显著影响[1]，特别是中亚地区湖泊变化及其引起的生态环境效应也已对社会可持续发展产生了较为深远的影响[2-4]。研究变化环境下中亚地区自然要素的演变机制并揭示未来的变化规律，对维系干旱区脆弱生态系统安全，促进区域社会可持续发展，进而保障“一带一路”倡议的实施具有重要的现实意义。位于哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖是伊犁河的尾闾，也是目前中亚地区面积最大的湖泊，其生态环境变化受到国际社会的广泛关注[5-8]。湖泊沉积物作为流域地表物质运移的主要载体，记载了流域气候环境变迁的信息，是缺器测资料地区重建古环境变化序列的可靠途径之一[9-10]。Endo等[11]利用巴尔喀什湖沉积物硅藻化石组合重建了过去千年的水位变化，巴尔喀什湖水位经历了4个较低的时期：1060—1260年、1560—1600年、1780—1840年、1950—1990年。此外前人利用多种代用资料重建了近千年来的巴尔喀什湖流域气温和降水量[12-13]，中亚干旱区干湿变化[14]。结果表明，气温变化趋势与降水相反，是亚洲中部干旱区“暖干”和“冷湿”型

收稿日期：2020-06-13；**修订日期：**2021-01-27
基金项目：国家自然科学基金（U1903115）；新疆维吾尔自治区天山青年计划（2018Q008）
作者简介：贺振杰（1995-），男，硕士研究生，主要从事湖泊沉积与环境演变研究. E-mail: hezhenjie18@mails.ucas.ac.cn
通讯作者：马龙（1982-），男，博士，研究员，主要从事干旱区湖泊水资源、干旱区流域地表过程、湖泊沉积与环境研究. E-mail: malong@ms.xjb.ac.cn

气候特点的体现，过去千年湖水位与流域降水量的变化趋势基本一致，流域的降水可能主导了湖水位的升降。已有研究表明1930年之后沉积物中重金属的富集反映了流域内人类活动的持续增强[15]，器测记录显示20世纪50年代以来流域内人类活动显著增加[16-18]。研究人类活动显著增强背景下湖泊沉积物中环境代用指标对区域环境变化特别是人类活动的响应程度，可为长时间尺度下古环境重建提供重要参考依据，也对揭示人类活动对巴尔喀什湖的影响具有重要的科学价值。

湖泊沉积物中的粒度指标一直是开展古气候、古环境研究的有效指标之一[19-22]。理想状态下从湖岸到湖心，由于水深逐渐增大、水动力条件逐渐减弱，其粒度变化分布为环带状，从湖心到湖岸粒度逐渐增大，依次为黏土、粉砂、砂和砾[23]。因此，在干旱气候下，湖泊水位下降，湖面收缩，采样点距离湖岸近，粒度较粗；在湿润气候下，湖泊水位上升，湖面扩张，采样点距离湖岸远，粒度较细。自然状态下沉积物粒度由于受多种动力的作用，湖泊沉积物粒度分布可以指示沉积物源、搬运介质、搬运方式及搬运介质能量的高低[23-25]，例如，在年际、10 a尺度下，湖泊水位相对稳定，降雨量成为粒度变化的主控因素，在降雨量较大的湿润年份中，径流搬运动力强，将较粗的物质搬运入湖；反之，在降雨量较小的干旱年份中，搬运入湖的物质较细[26]。因为粒度参数对区域环境变化的敏感，目前广泛用于古环境变化的研究中，不仅可以重建流域湿度和湖泊水位[23-27]，还可以辨识搬运环境[28-30]，揭示干旱-半干旱地区的沙尘天气[31-33]以及相关的流域自然环境变化特征[34-35]。

本文以哈萨克斯坦巴尔喀什湖湖泊沉积物粒度参数为主要研究对象，结合^{137}Cs定年、湖泊沉积物磁化率指标以及巴尔喀什湖地区器测气候、水文记录[36-37]，探讨巴尔喀什湖湖泊岩芯沉积物中粒度的变化特征及其对区域环境的响应，以期为长时间尺度古环境重建研究提供科学参考。

1 研究区概况

巴尔喀什湖(73°20′~79°11′E，45°00′~46°44′N)位于哈萨克斯坦东南部。湖泊多年平均水位为342.0 m，湖泊东西长约614.0 km，南北平均宽约30.0 km，最大宽约70.0 km，水域面积18200 km^2，最大水深26.5 m，平均深度5.8 m，水储量约106.0 km^3[38]。位于湖中部的萨雷姆瑟克半岛以北的乌泽纳拉尔湖峡(宽约3.5 km)把巴尔喀什湖分为东西两部分，东部湖泊由阿克苏河、卡拉塔尔河、列普西河和阿亚古兹河注入，长318.0 km，平均宽24.0 km，最大宽度47.5 km，面积7600 km^2，平均水深7.6 m，最大水深26.5 m，水量57.5 km^3；西部湖泊由伊犁河注入，长396.0 km，平均宽36.0 km，最大宽度70.0 km，平均水深4.6 m，最大水深11.0 m，面积10630 km^2，水量48.5 km^3[39]。巴尔喀什湖流域面积41.3×10^4 km^2[38]，年降水量140 mm，蒸发量1000 mm[40]。伊犁河口在巴尔喀什湖形成的三角洲面积为8000 km^2，三角洲内分布着众多湖泊、沼泽和盐碱地[18,40]。湖泊北面是狭长的干旱草原地带，湖北沿岸区、阿拉湖盆及湖泊南岸至天山和准噶尔阿拉套山为荒漠地带[17-18]。流域农业用地占流域总面积的78%，自然景观类型有森林、草原、半荒漠草原及湖泊和水库，占流域总面积的22%。流域水资源主要用于灌溉、水稻作物、工业、居民区供水和渔业，流域农业土地灌溉用水占比也是最大的，超过总用水量的82%[5,41]。

2 材料与方法

2017年7月采用UWITEC重力采集器，在巴尔喀什湖西部(45°41′05″N，73°45′05″E)采集49 cm长的沉积物岩芯(BK01，图1)，采样点水深约8 m，采样点距离东部湖岸直线距离约34 km，距离西部湖岸直线距离约21 km。在野外以1 cm的间隔分样，装入塑料袋中密封保存。采用美国EG&GORTEC公司生产的由高纯锗井型探测器(Ortec HPGe GWL)测定^{137}Cs的比活度。沉积物粒度的测试步骤：(1)将0.3 g左右样品、20 mL的蒸馏水和10 mL浓度为10%的双氧水(H_2O_2)加入100 mL的烧杯中，摇匀并加热以去除样品中的有机质；(2)烧杯内的双氧水完全分解后，加入10 mL 10%的盐酸，加热使之充分反应，目的在于除去样品中的碳酸盐和有机质胶结；(3)将烧杯中加100 mL蒸馏水，静置24 h，倒去上清液，加入10 mL 0.05 mol·L^{-1}的六偏磷酸钠[$(NaPO_3)_6$]溶液，摇匀后置于超声波分散器中分散15 min。处理后的样品用英国Malvern公司生产的Mastersizer 2000激光粒度仪进行测量，测量范围为0.02~2000 μm，重复测量误差小于1%[33,42]。磁化率的测量以1 cm为间隔取样，采用英国Bartington

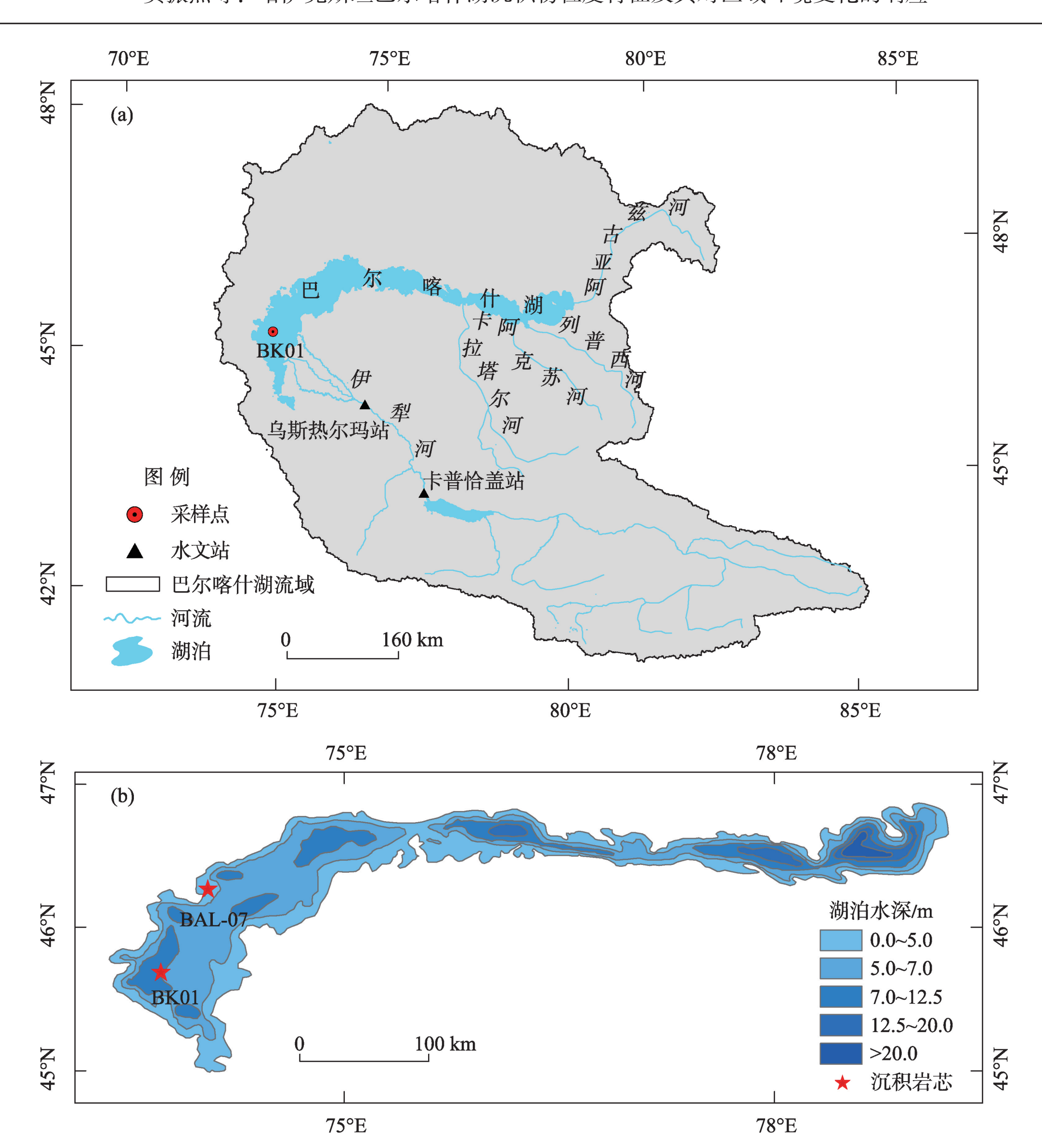


图1　巴尔喀什湖地理位置以及岩芯(BK01)采样点和参照岩芯(BAL-07)位置图

Fig. 1　Geographical location of Balkhash Lake and the sampling points of the sediment core (BK01) in this study and sediment core (BAL-07) from the reference

MS2型磁化率测量仪对低频磁化率进行测量，同一样品测量3次后取平均值[43]。放射性同位素测年以及粒度分析在中国科学院南京地理与湖泊研究所分析测试中心完成，磁化率测试在中国科学院新疆生态与地理研究所（中国科学院新疆资源环境科学大型仪器区域中心）完成。

3　结果与分析

3.1　巴尔喀什湖岩芯沉积物年代标定及粒度变化特征

根据 ^{137}Cs 在北半球湖泊沉积剖面中的分布规律，主蓄积峰层位对应1964年全球 ^{137}Cs 散落高峰[44]，1986年切尔诺贝利反应堆核泄漏导致 ^{137}Cs 出现另一个峰值年。根据巴尔喀什湖沉积物岩芯中 ^{137}Cs 强度随深度的变化（图2），可以看出8 cm和17 cm处为 ^{137}Cs 的峰值，8 cm对应着1986年，17 cm处对应1964年，22 cm处对应1954年[15]。8 cm至表层沉积速率0.26 cm·a^{-1}，9~17 cm平均沉积速率0.41 cm·a^{-1}，18~22 cm平均沉积速率0.50 cm·a^{-1}。根据22 cm之上平均沉积速率0.35 cm·a^{-1}，将岩芯年代序列外延得到49 cm处年代约为1870年。本岩芯平均沉积速率为0.35 cm·a^{-1}，与采样点北部约68 km处岩芯沉积速率较为一致（BAL-07[11]，图1）。

BK01岩芯沉积物中黏土质(<4 μm)组分平均含量为20.32%，34 cm之下，黏土质(<4 μm)含量较

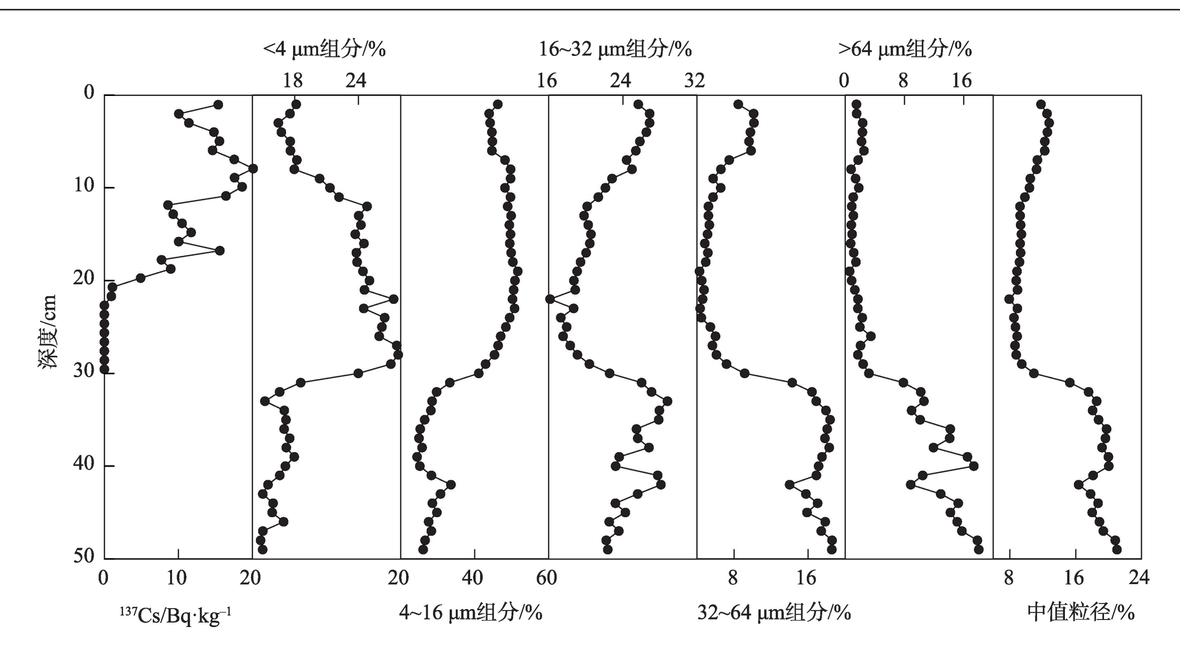


图2 巴尔喀什湖沉积岩芯(BK01)^{137}Cs比活度以及粒度垂向分布特征

Fig. 2 Specific activities of ^{137}Cs and the grain size distribution of sedimentary core (BK01) in Balkhash Lake

小，变幅不大，在10~30 cm黏土质含量最大(达24.70%)；细粉砂质(4~16 μm)为40.13%，在8~26 cm含量最高，平均为49.7%；中粉砂质(16~32 μm)平均为22.86%；粗粉砂质(32~64 μm)平均为10.55%，粗粉砂质组分在39 cm之下高且变化稳定，在25~39 cm之间急剧减小，25 cm之上低且变化较为稳定。砂质(>64 μm)组分平均含量为6.13%，在1~29 cm是较低的阶段。细粉砂质含量与中值粒径含量变化趋势呈反向变化；砂质组分含量与中值粒径含量的变化趋势基本一致。

3.2 巴尔喀什湖湖泊沉积物粒度环境敏感组分

在不同深度层位BK01岩芯沉积物粒度呈现不同峰态的频率分布曲线(图3a)。多峰态特征表明，沉积物可能来自同一物源但沉积动力过程不同，也可能是不同物源和不同沉积动力条件相互作用的结果[23-24]。粒级-标准偏差方法通过提取环境敏感组分，以此来揭示沉积物粒度对沉积环境变化的响应过程[45-46]。标准偏差变化曲线主要反映同一岩芯沉积物不同层位样品各粒径间含量的变化差异性，高的标准差值反映某一粒级的含量差异较大，是对

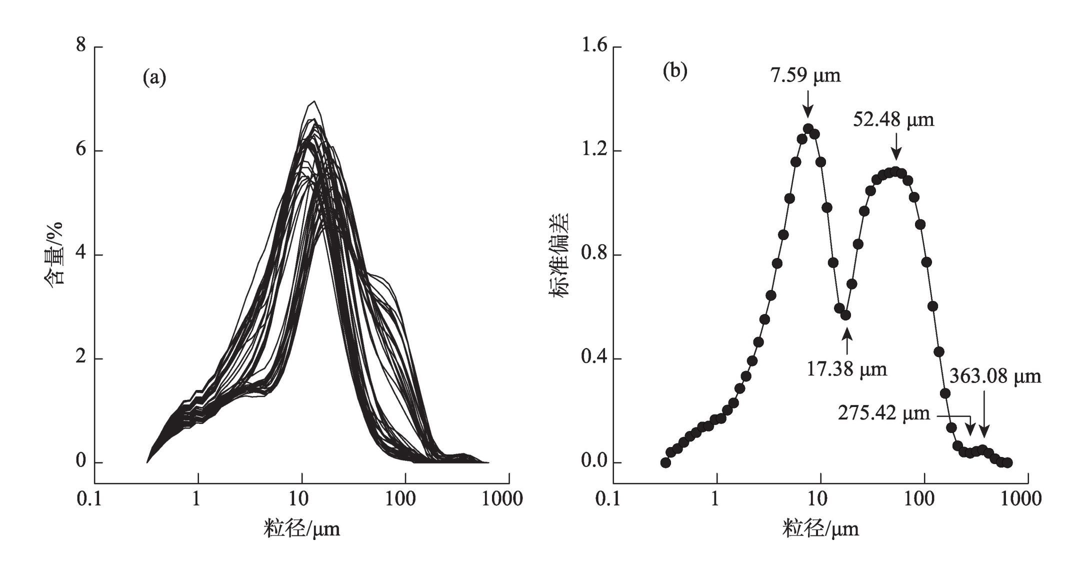


图3 巴尔喀什湖岩芯沉积物频率分布曲线和巴尔喀什湖沉积物粒径标准偏差

Fig. 3 Grain-size distribution of Balkhash Lake sediment and standard deviation curve of Balkhash Lake sediment grain-size

沉积环境响应敏感的粒级[47-49]。粒径标准-偏差法在干旱-半干旱地区的沉积物研究中得到广泛应用[30,32,49]，巴尔喀什湖岩芯沉积物样品的粒径标准偏差曲线如图3b所示，图中较高的标准偏差所对应的粒级即对环境变化较为敏感的组分。从曲线中可以看出主峰峰值对应的粒径为7.59 μm，次峰峰值对应的粒径为52.48 μm，最小峰峰值对应的粒径是363.08 μm。据此，可以把湖泊沉积物的粒度分成3个敏感组分：细颗粒敏感组分（F1，6.61~10.00 μm）、粗颗粒敏感组分（F2，45.71~69.18 μm）和粗颗粒敏感组分（F3，363.00 μm）。由于F3含量远<0.10%，故不讨论其环境意义。

由于组分3（>275.42 μm）的平均含量为0.10%，导致组分1（C1，<17.38 μm）和组分2（C2，17.38~275.42 μm）含量反相关，垂向变化图上表现为此消彼长的趋势。C1含量的变化趋势与F1含量的变化趋势一致，相关系数r为0.983（P<0.01），C2和F2含量的变化趋势一致，相关系数r为0.985（P<0.01）。因此仅讨论敏感组分F1（6.61~10.00 μm）或者F2（45.71~69.18 μm）的变化趋势和原因，就可以从整体上把握巴尔喀什湖湖泊沉积物粒度变化的总体特征（图4）。1870—1920年F2含量保持相对较高的状态，1920—1950年敏感组分F2含量迅速下降，直到1990年其含量均保持在一个较低且稳定的状态，之后略有下降，但含量基本保持稳定状态。

4 讨论

湖泊沉积物中粒度参数对区域环境变化的响应敏感[50-51]。在湿润-半湿润区，对程海、洱海[26]的研究表明：在百年、千年尺度，粗粒沉积物指示湖泊收缩、湖水较浅的干旱气候期；细粒沉积物指示湖泊扩张、湖水较深的湿润气候期；在年际、10 a尺度，粗颗粒沉积物指示降雨量较大的湿润年份；细颗粒沉积物指示降雨量较小的干旱年份。洪泽湖湖泊沉积物粒度特征亦指示在长时间尺度下，沉积物粒度主要由湖泊水位决定，沉积物粒度较小指示湿润时期的高水位[52]；沉积物粒度较大指示干旱时期的低水位；而在短时间尺度时，粒度变化由降雨决定。关于兴凯湖的研究指出，千年尺度下粗粉砂和砂增多对应于降水减少的低湖面时期，细粉砂增多对应于降水增加的高湖面时期，而黏土增加则对应于气候干燥的静水沉积环境[53]。在干旱-半干旱区

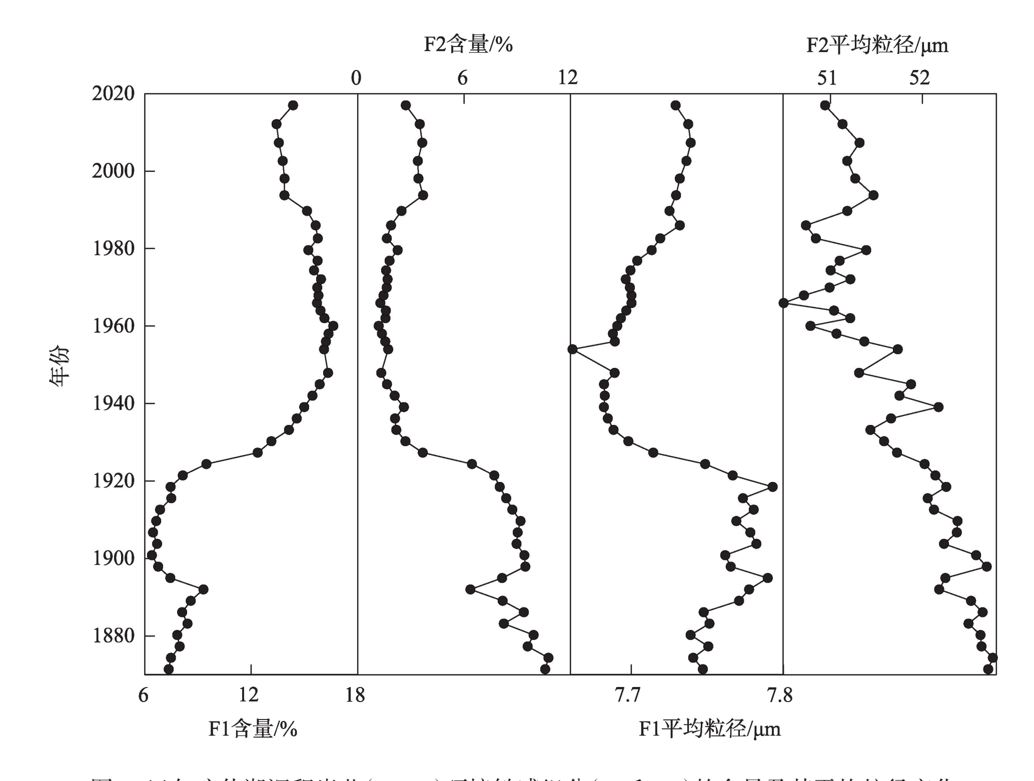


图4 巴尔喀什湖沉积岩芯（BK01）环境敏感组分（F1和F2）的含量及其平均粒径变化

Fig. 4 Contents and mean grain-size of the environmentally sensitive components (F1 and F2) in the core sediment (BK01) of Balkhash Lake

的气候干旱期，乌伦古湖湖泊沉积物粒度较小，湖泊水位较低；气候湿润期，降水量多，湖泊水位高，沉积物颗粒较粗[24]。而针对陕北红碱淖沉积物的研究表明，低洼湿地形成湖泊期间，入湖径流较小，则水动力较弱则沉积颗粒较小；形成湖泊后，降雨量增多，湖泊水位的升高，将会使细颗粒物质增加[54]。在博斯腾湖地区，从年际到数百年的尺度上沉积物粒度代表了区域来水量的变化以及洪水发生的频率和强度[55]，湖泊水位下降时，粗颗粒物质增多，水位上升时，细颗粒沉积物质增多[56]。综上来看，湖泊沉积物粒度的变化反映了入湖径流以及湖泊水位的变化。但是从巴尔喀什湖沉积物粒度敏感组分F1含量、低频磁化率、流域温度和降水量[57]、流域帕默尔干旱指数（PDSI）[58-59]、湖泊水位[60-61]及伊犁河三角洲顶端水文站乌斯热尔玛站径流量[16]的变化曲线对比来看（图5），巴尔喀什湖湖泊沉积物粒度特征表现出一定的差异性。巴尔喀什湖入湖径流的变化与湖泊水位的变化趋势基本一致。1900—1950年巴尔喀什湖沉积物细颗粒敏感组分F1含量变化与湖泊水位的变化趋势相反。其中，1920—1950年F1含量出现快速增加的趋势，尤其是在1920—1930年，湖泊水位也呈现快速上升的趋势，二者的变化趋势在此时期呈现负相关。1950年之后，湖泊水位经历了多次大幅度变化，但是F1含量变化与湖泊水位相比，变化幅度很小；沉积物环境敏感组分的变化趋势表明1950年之前，湖泊水位的变化对沉积物粒度产生一定的影响。自1950年之后，沉积物颗粒敏感组分与巴尔喀什湖湖泊水位的变化相关性很差。

BK01岩芯沉积物低频磁化率在1930年之前变化稳定且处于较低阶段，1930—1950年快速上升，1950—1990年上升较慢，之后略有下降。这表明，自1930年人类活动开始发生发展，在1930—1950年人类活动强度急剧增加。该岩芯元素地球化学也显示自1930年以来，湖泊沉积物中潜在有毒元素（Cr、Co、Ni、Zn、Cu、Cd、Pb）明显受到人类活动的影

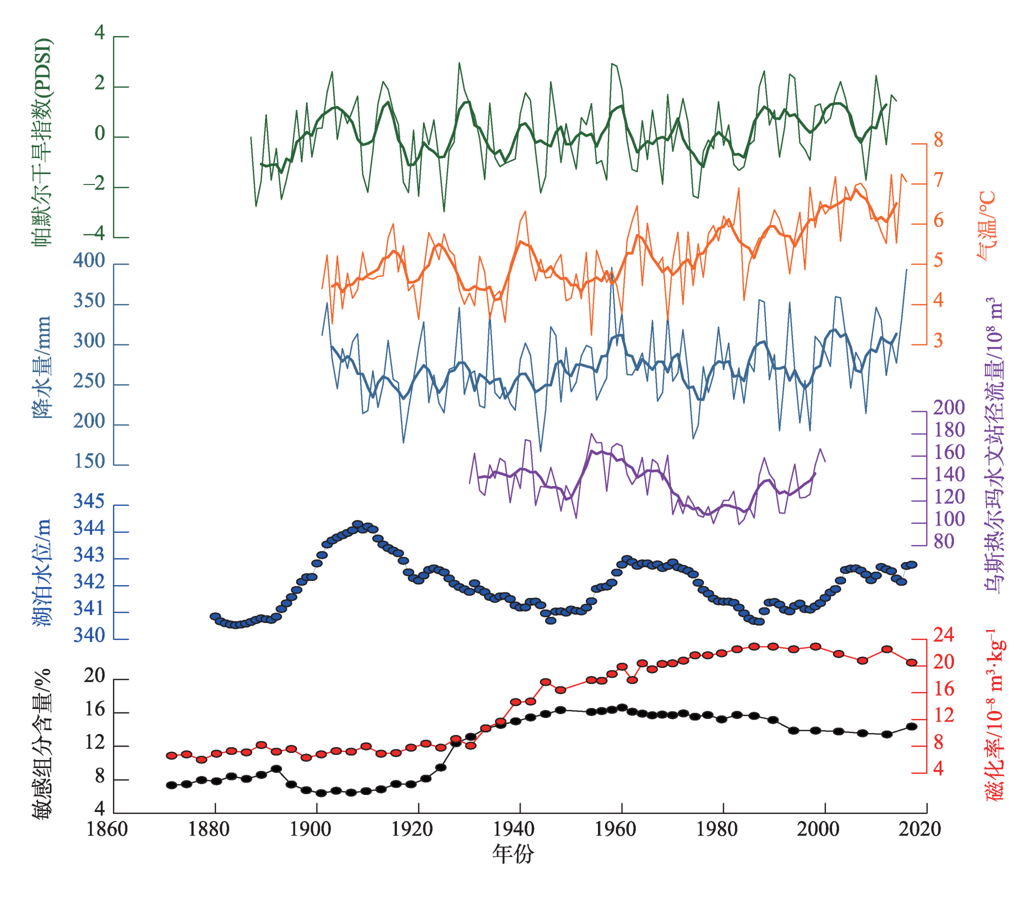


图5 巴尔喀什湖沉积物细颗粒环境敏感组分（F1，6.61~10.00 μm）含量、磁化率、水位、降水量和气温、径流量和帕默尔干旱指数（PDSI）变化曲线及其5点滑动平均变化曲线

Fig. 5 Variation curves of environmental sensitive components of fine particles contents (F1, 6.61~10.00 μm), magnetic susceptibility, water level, watershed precipitation, temperature, runoff and PDSI in the region of Balkhash Lake and its 5 point moving average line

响[15]。在20世纪20年代末期，哈萨克斯坦境内伊犁河流域人类开始大范围开发，尤其是1927年开始，苏维埃政权在伊犁-巴尔喀什地区发展畜牧业的同时，大力垦荒灌溉，并且建立了众多灌区，伊犁河-巴尔喀什流域总灌溉面积逐年扩大[62]。通过研究发现F1和F2含量变化与低频磁化率的相关系数为0.870（P<0.01）和-0.840（P<0.01），低频磁化率的变化趋势与敏感组分F1的含量存在显著的相关关系。流域表土中含有丰富的磁性物质，人类活动会破坏植被和表土，导致地表发生水土流失，大量表土物质被搬运入湖，这个过程将使湖泊沉积物中的磁性物质增加，因此沉积物磁化率可以反映人类活动的强度变化[63-64]。在苏联解体前，1980—1990年左右达到最高，前苏联解体后，人口剧减，农田水利设施破损严重，土地私有化，大量土地撂荒[5,61,65]。1990年以来（0~10 cm），环境敏感组分F1含量有一定程度的下降，在此期间磁化率变化不明显，但整体也呈现一定程度的下降趋势（图5）。另外，近几十年来，天山西部降水增多[66-67]，尤其是1990年以来巴尔喀什湖流域降水呈现比较显著的增加，降水增加导致地表侵蚀强度的增强，由此也可能导致沉积物中粗颗粒组分含量的增加和细颗粒组分的降低。

综上所述，不同时段内湖泊水位、流域降水等环境变化对巴尔喀什湖沉积物中粒度参数产生了影响。但整体上沉积物环境敏感组分的含量变化间接指示了流域的水土流失状况及人类活动的历史变化。人类活动增强导致的流域内富含磁性物质的细颗粒碎屑物质被搬运入湖，湖泊沉积物中磁化率升高的同时，湖泊沉积物中细颗粒物质增加。由于巴尔喀什湖面积巨大，水文情况及其复杂，本文开展的岩芯研究仅能反映采样点局部地区沉积物粒度的变化特征，对整体研究巴尔喀什湖沉积环境变化存在一定的局限性。

5 结 论

以哈萨克斯坦巴尔喀什湖湖泊沉积物为研究对象，在^{137}Cs定年的基础上，结合沉积物磁化率、流域气候、径流、湖泊水位等环境变化数据，研究了巴尔喀什湖岩芯沉积物粒度的变化特征及其对区域环境变化的响应。得出主要结论如下：

（1）巴尔喀什湖岩芯沉积物中黏土质和细、中粉砂质组分为主，分别占总量的20.32%、40.13%和22.86%。粗粉砂质含量为10.55%，砂质含量为6.13%。其中，1920—1930年沉积物岩芯粒度组分含量变化较大，表现为黏土质和细粉砂质含量的增多，中、粗粉砂质和砂质含量的减小。运用粒径标准-偏差法提取了巴尔喀什湖沉积物粒度环境敏感组分，分别为环境敏感组分F1（6.61~10.00 μm）、组分F2（45.71~69.18 μm）。

（2）基于环境敏感组分变化特征的分析表明尽管不同时段内湖泊水位、流域降水等环境变化对巴尔喀什湖沉积物粒度产生了影响。但整体上沉积物环境敏感组分的含量变化间接指示了流域的水土流失状况及人类活动的历史变化。这与人类活动增强导致的流域内富含磁性物质的细颗粒碎屑物质被搬运入湖，湖泊沉积物中磁化率升高的同时，湖泊沉积物中细颗粒物质增加有关。

参考文献（References）

[1] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(11): 963-977.

[2] 白洁, 陈曦, 李均力, 等. 1975—2007年中亚干旱区内陆湖泊面积变化遥感分析[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 80-88. [Bai Jie, Chen Xi, Li Junli, et al. Changes of inland lake area in arid Central Asia during 1975—2007: A remote-sensing analysis[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(1): 80-88.]

[3] Mischke S, Liu C, Zhang J, et al. The world's earliest Aral-Sea type disaster: The decline of the Loulan Kingdom in the Tarim Basin[J]. Scientific Reports, 2017(7): 43102, doi: 10.1038/srep43102.

[4] Donchyts G, Baart F, Winsemius H, et al. Earth's surface water change over the past 30 years[J]. Nature Climate Change, 2016(6): 810-813.

[5] Kezer K, Matsuyama H. Decrease of river runoff in the Lake Balkhash Basin in Central Asia[J]. Hydrol Processes, 2006, 20(6): 1407-1423.

[6] Propastin P A. Simple model for monitoring Balkhash Lake water levels and Ili River discharges: Application of remote sensing[J]. Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use, 2008, 13(1): 77-81.

[7] Pereira J J. Climate change and disaster risk management[M]. Berlin: Springer, 2013: 41-54.

[8] 黄坤, 马龙, 吉力力·阿不都外力. 基于小波分析的巴尔喀什湖水位变化特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 570-

579. [Huang Kun, Ma Long, Jilili Abuduwaili. A study of the water level variation of Lake Balkhash: Its influencing factors based on wavelet analysis[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 570-579.]
[9] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587. [Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress in the study of lake sediment and environmental evolution in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(6): 579-587.]
[10] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 307-313. [Shen Ji. Progress and prospect of palaeolimnology research in China[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(3): 307-313.]
[11] Endo K, Chiba T, Sugal T, et al. Reconstruction of lake level and paleoenvironmental changes from a core from Balkhash Lake, Kazakhstan[C]//Watanabe M, Kubota J. Reconceptualizing Cultural and Environmental Change in Central Asia: An Historical Perspective on the Future. Kyoto, Japan: Ili Project Research Institute for Humanity and Nature, 2010: 93-104.
[12] Aubekerov B Z, Nigmatova S A, Sala R, et al. Complex analysis of the development of Lake Balkhash during the last 2000 years[C]// Watanabe M, Kubota J. Reconceptualizing Cultural and Environmental Change in Central Asia: An Historical Perspective on the Future. Kyoto, Japan: Ili Project Research Institute for Humanity and Nature, 2010: 77-92.
[13] Feng Z D, Wu H N, Zhang C J, et al. Bioclimatic change of the past 2500 years within the Balkhash Basin, eastern Kazakhstan, Central Asia[J]. Quaternary International, 2013, 311: 63-70.
[14] Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid Central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. Quaternary Science Reviews, 2010, 29(7-8): 1055-1068.
[15] Huang K, Ma L, Abuduwaili J, et al. Human-induced enrichment of potentially toxic elements in a sediment core of Lake Balkhash, the largest lake in Central Asia[J]. Sustainability, 2020, 12(11): 4717.
[16] 邓铭江, 王志杰, 王姣妍. 巴尔喀什湖生态水位演变分析及调控对策[J]. 水利学报, 2011, 42(4): 403-413. [Deng Mingjiang, Wang Zhijie, Wang Jiaoyan. Analysis of Balkhash Lake ecological water level evolvement and its regulation strategy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(4): 403-413.]
[17] 谢蕾, 龙爱华, 邓铭江, 等. 伊犁河下游三角洲生态耗水研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1130-1340. [Xie Lei, Long Aihua, Deng Mingjiang, et al. Study on ecological water consumption in delta of the reaches of Ili River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1130-1340.]
[18] 吴淼, 张小云, 王丽贤, 等. 哈萨克斯坦巴尔喀什湖-阿拉湖流域水资源及其开发利用[J]. 河海大学学报, 2013, 41(1): 11-20. [Wu Miao, Zhang Xiaoyun, Wang Lixian, et al. Water sources and their exploitation and utilization in Balkhash-Alakol Lake Basin in Kazakhstan[J]. Journal of Hohai University, 2013, 41(1): 11-20.]
[19] Dietze E, Hartmann K, Diekmann B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China[J]. Sedimentary Geology, 2012, 243: 169-180.
[20] Chiverrell R, Sear D, Warburton J, et al. Using lake sediment archives to improve understanding of flood magnitude and frequency: Recent extreme flooding in northwest UK[J]. Earth Surface Processes Landforms, 2019, 44(12): 2366-2376.
[21] Liang X, Niu Q, Qu J, et al. Applying end-member modeling to extricate the sedimentary environment of yardang strata in the Dunhuang Yardang National Geopark, northwestern China[J]. Catena, 2019, 180: 238-251.
[22] Zhou J, Wu J, Ma L, et al. Late Quaternary lake-level and climate changes in arid Central Asia inferred from sediments of Ebinur Lake, Xinjiang, northwestern China[J]. Quaternary Research, 2019, 92(2): 416-429.
[23] 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 93-95. [Sun Qianli, Zhou Jie, Xiao Jule. Grain-size characteristics of Lake Daihai sediments and its paleaoenvironment significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 93-95.]
[24] 蒋庆丰, 刘兴起, 沈吉. 乌伦古湖沉积物粒度特征及其古气候环境意义[J]. 沉积学报, 2006, 24(6): 877-882. [Jiang Qingfeng, Liu Xingqi, Shen Ji. Grain-size characteristics of Wulugu Lake sediments and its palaeoclimate and palaeoenvironment implication [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(6): 877-882.]
[25] 郭晓阳, 王维, 王国良, 等. 季风边缘区湖泊表层沉积物粒度组分分布特征与影响因素[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 677-691. [Guo Xiaoyang, Wang Wei, Wang Guoliang, et al. Within-lake distributions of grain-size components and environmental implications based on the survey of lake surface sediment of Chinese monsoon marginal area[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 677-691.]
[26] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2003, 33(6): 563-568. [Chen Jingan, Wan Guojiang, Zhang Feng, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: Sediment grain size as an example[J]. Science in China Series D : Earth Sciences, 2003, 33(6): 563-568.]
[27] 陈敬安, 万国江, 唐德贵, 等. 洱海近代气候变化的沉积物粒度与同位素记录[J]. 自然科学进展, 2000, 10(3): 253-259. [Chen Jingan, Wan Guojiang, Tang Degui, et al. Grain-size and isotope records of modern climatic change in Erhai Lake[J]. Progress in Nature Science, 2000, 10(3): 253-259.]
[28] 马龙, 吴敬禄, 温军会, 等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 646-652. [Ma Long, Wu Jinglu, Wen Junhui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia[J]. Acta Sedimentologica Sinica,

2013, 31(4): 646-652.]

[29] 周建超, 吴敬禄, 曾海鳌. 新疆喀纳斯湖沉积物粒度组分所揭示的环境特征[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(6): 859-868. [Zhou Jianchao, Wu Jinglu, Zeng Haiao. Environmental characteristics inferred from sediment sensitive grain-size component records in Kanas Lake of Xinjiang[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2016, 38(6) : 859-868.]

[30] 周建超, 吴敬禄, 曾海鳌. 新疆乌伦古湖沉积物粒度特征揭示的环境信息[J]. 沉积学报, 2017, 35(6): 1158-1165. [Zhou Jianchao, Wu Jinglu, Zeng Haiao. Environmental information inferred from environmentally sensitive grain-size component records in Wulungu Lake, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(6): 1158-1165.]

[31] 沈吉, 汪勇, 羊向东, 等. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史: 以陕西红碱淖湖泊为例[J]. 科学通报, 2006, 51(1): 87-92. [Shen Ji, Wang Yong, Yang Xiangdong, et al. Paleosandstorm characteristics and lake evolution history deduced from investigation on lacustrine sediments: The case of Hongjiannao Lake, Shaanxi Province[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(1): 87-92.]

[32] 薛积彬, 钟巍. 干旱区湖泊沉积物粒度组分记录的区域沙尘活动历史——以新疆巴里坤湖为例[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 647-654. [Xue Jibin, Zhong Wei. Variations in dust event reflected by grain-size component of lacustrine records in droughty area: A case study on Barkol Lake, Xinjiang, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 647-654.]

[33] 马龙, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力. 新疆柴窝堡湖沉积物中环境敏感粒度组分揭示的环境信息[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 945-954. [Ma Long, Wu Jinglu, Abuduwaili Jilili. Environmental changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records in Chaiwopu Lake, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 945-954.]

[34] Xiao J, Inouchi Y, Kumal H, et al. Eolian quartz flux to Lake Biwa, central Japan, over the past 145000 years[J]. Quaternary Research, 1997, 48(1): 48-57.

[35] 叶芳, 刘志飞, 拓守廷, 等. 南海北部中更新世0.78~1.0 Ma期间的陆源碎屑粒度记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(2): 77-83. [Ye Fang, Liu Zhifei, Tuo Shouting, et al. Grain size record of terrigenous clast during mid-Pleistocene transition (0.78~1.0 Ma) in the northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(2): 77-83.]

[36] 郭利丹, 夏自强, 李捷, 等. 巴尔喀什湖流域气候变化特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2008, 36(3): 316-321. [Guo Lidan, Xia Ziqiang, Li Jie, et al. Characteristics of climatic change in the Balkhash Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2008, 36(3): 316-321.]

[37] 杨川德, 邵新媛. 亚洲中部湖泊近期变化[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 15-25. [Yang Chuande, Shao Xinyuan. Recent changes of lakes in Central Asia[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 15-25.]

[38] Mischke S. Large Asian lakes in a changing world[M]. Switzerland: Springer, 2020: 145.

[39] 杨川德. 巴尔喀什湖水位变化及其原因[J]. 干旱区地理, 1993, 16(1): 36-42. [Yang Chuande. Water level of Balkhash Lake and its reason for change[J]. Arid Land Geography, 1993, 16(1): 36-42.]

[40] 高彦华, 王洪亮, 周旭, 等. 巴尔喀什湖近30余年动态变化遥感监测与分析[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(1): 102-106. [Gao Yanhua, Wang Hongliang, Zhou Xu, et al. Remote sensing monitoring and analyses of the dynamic change of Balkhash Lake in the last 30 years[J]. Environment and Sustainable Development, 2016, 41(1): 102-106.]

[41] 吉力力·阿不都外力. 干旱区湖泊与盐尘暴[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 18. [Abuduwaili Jilili. Lake of arid land and salt-dust storms[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012: 18.]

[42] 鹿化煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2535-2538. [Lu Huayu, An Zhisheng. Pretreated methods on loess-palaeosol samples granulometry[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23): 2535-2538.]

[43] 杜丁丁, Mughal M S, Blaise D, 等. 青藏高原中部色林错湖泊沉积物色度反映末次冰盛期以来区域古气候演化[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 551-558. [Du Dingding, Mughal M S, Blaise D, et al. Paleoclimatic changes reflected by diffuse reflectance spectroscopy since last glacial maximum from Selin Co Lake sediments, central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(3): 551-558.]

[44] 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物^{210}Pb、^{137}Cs垂直分布及年代学意义[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 981-987. [Chen Shiyue, Wang Sumin, Chen Yingying, et al. Vertical distribution and chronological implication of ^{210}Pb and ^{137}Cs in sediments of Dongping Lake, Shandong Province[J]. Quaternary Science, 2009, 29(5): 981-987.]

[45] Xiang R, Yang Z, Saito Y, et al. East Asia winter monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS[J]. Science in China Series D, 2006, 49(6): 604-614.

[46] Zhou X, Yang W, Xiang R, et al. Re-examining the potential of using sensitive grain size of coastal muddy sediments as proxy of winter monsoon strength[J]. Quaternary International, 2014, 333: 173-178.

[47] 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析[J]. 科学通报, 2003, 48(1): 83-86. [Sun Youbin, Gao Shu, Li Jun. Preliminary analysis of grain size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting [J]. Science Bulletin, 2003, 48(1): 83-86.]

[48] 向荣, 杨作升, Ssito Y, 等. 济州岛西南泥质区近2300 a来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化[J]. 中国科学, 2006, 36(7): 654-662. [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, et al. East Asian winter monsoon recorded by environmental sensitive grain

size composition in southwestern muddy area of Jeju Island in recent 2300 a[J]. Science China, 2003, 48(1): 83-86.]

[49] Ma L, Wu J, Abuduwaili J. Climate and environmental changes over the past 150 years inferred from the sediments of Chaiwopu Lake, central Tianshan Mountains, northwest China[J]. International Journal of Earth Sciences, 2013, 102(3): 959-967.

[50] Ma L, Abuduwaili J, Liu W, et al. Variations in sediment grain size from a lake in the Tianshan Mountain of Central Asia: Implications for paleoprecipitation reconstruction[J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 1802, doi: 10.3390/app10196793.

[51] Ma L, Abuduwaili J, Liu W. Environmentally sensitive grain-size component records and its response to climatic and anthropogenic influences in Bosten Lake region, China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 942, doi: 10.1038/s41598-020-57921-y.

[52] 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 590-596. [He Huachun, Ding Haiyan, Zhang Zhenke. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 590-596.]

[53] 吴健, 沈吉. 兴凯湖沉积物粒度特征揭示的27.7 ka BP以来区域古气候演化[J]. 湖泊科学, 2010, 22(1): 110-118. [Wu Jian, Shen Ji. Paleoclimate evolution since 27.7 ka BP reflecected by grain size variation of a sediment core from Lake Xingkai, northern Asia[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 110-118.]

[54] 汪勇, 沈吉, 羊向东, 等. 陕北红碱淖沉积物粒度特征所揭示的环境变化[J]. 沉积学报, 2006, 24(3): 349-355. [Wang Yong, Shen Ji, Yang Xiangdong, et al. Environmental changes deduced from grain-size characteristics of the sediments from Hongjiannao Lake, Shaanxi Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 349-355.]

[55] 黄小忠, 陈发虎, 肖舜, 等. 新疆博斯腾湖沉积物粒度的古环境意义初探[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3): 291-297. [Huang Xiaozhong, Chen Fahu, Xiao Shun, et al. Primary study on the environmental significances of grain-size changes of the Lake Bosten sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, 20(3): 291-297.]

[56] 华攸胜, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 新疆博斯腾湖近现代湖泊沉积物粒度分布特征及其环境记录[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1109-1116. [Hua Yousheng, Ma Long, Abuduwaili Jilili. Grain-size distribution characteristics and its environmental records of modern lacustrine sediments from Bosten Lake, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1109-1116.]

[57] Harris I, Jones P D, Osborn T J, et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations: The CRU TS3.10 dataset [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 623-642.

[58] Royal Netherlands Meteorological Institute, Van Der Schrier G, Briffa K R, et al. Global maps of monthly self-calibrating Palmer drought severity index (scPDSI) based on the climatic research unit time series (CRU TS) 3.10.01 data (1901—2009)[M]. Didcot: NCAS British Atmospheric Data Centre, 2013.

[59] Van Der Schrier G, Barichivich J, Briffa K R, et al. A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901—2009[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(10): 4025-4048.

[60] 郭利丹, 夏自强, 王志坚. 咸海和巴尔喀什湖水文变化与环境效应对比[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 764-770. [Guo Lidan, Xia Ziqiang, Wang Zhijian. Comparisons of hydrological variations and environmental effects between Aral Sea and Lake Balkhash [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 764-770.]

[61] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 巴尔喀什湖水量平衡研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1341-1352. [Long Aihua, Deng Mingjiang, Xie Lei, et al. A study of the water balance of Lake Balkhash[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1341-1352.]

[62] 付颖昕, 杨恕. 苏联时期哈萨克斯坦伊犁-巴尔喀什湖流域开发述评[J]. 兰州大学学报, 2009, 37(4): 16-24. [Fu Yingxin, Yang Shu. Commentary on the development of Kazakhstan Ili-Balkhash Basin during the Soviet Period[J]. Journal of Lanzhou University, 2009, 37(4): 16-24.]

[63] 张振克, 吴瑞金, 朱育新, 等. 云南洱海流域人类活动的湖泊沉积记录分析[J]. 地理学报, 2000, 55(1): 68-76. [Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Zhu Yuxin, et al. Lacustrine records of human activities in the catchment of Erhai Lake, Yunnan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(1): 68-76.]

[64] Matsumoto R. Lake sediment records on climate change and human activities since the Holocene in Erhai Catchment, Yunnan Province[J]. Science in China Series D, 2005, 48(3): 353-363.

[65] 朱磊, 罗格平, 陈曦, 等. 伊犁河中下游近40年土地利用与覆被变化[J]. 地理科学进展, 2010, 29(3): 292-300. [Zhu Lei, Luo Geping, Chen Xi, et al. Detection of land use/land cover change in the middle and lower researches of the Ili River, 1970—2007[J]. Progress in Geography, 2010, 29(3): 292-300.]

[66] 廉陆鹞, 刘滨辉. 近58 a我国西北地区干期与湿期变化特征[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1301-1309. [Lian Luyao, Liu Binhui. Change characteristics of dry and wet spells in northwest China during the past 58 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1301-1309.]

[67] 田亚林, 李雪梅, 李珍, 等. 1980—2017年天山山区不同降水形态的时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 308-318. [Tian Yalin, Li Xuemei, Li Zhen, et al. Spatial and temporal variations of different precipitation types in the Tianshan Mountains from 1980 to 2017[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 308-318.]

Grain-size characteristics of lacustrine sediments in Balkhash Lake, Kazakhstan and its response to regional environmental changes

HE Zhenjie[1,2,3], MA Long[1,2,3], Jilili ABUDUWAILI[1,2,3], LIU Wen[1,2,3],
Gulnura ISSANOVA[2,4], Galymzhan SAPAROV[2,5], HUANG Kun[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Faculty of Geography and Environmental Sciences, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan; 5. Kazakh Research Institute of Soil Science and Agrochemistry Named after U. U. Uspanov, Almaty 050060, Kazakhstan)

Abstract: Lake sediment grain-size data give a wealth of information regarding watershed environmental change and can provide a reliable method to reconstruct paleoenvironmental changes in areas without instrumental data. Through the analysis of environmental proxies, such as grain size and the magnetic susceptibility of the core sediments of Lake Balkhash, combined with radioactive ^{137}Cs dating and instrumental data including the regional climate and lake water level, characteristics regarding the grain size of the sediments of Lake Balkhash in Kazakhstan and their environmental meanings were established. The results show that the average contents of the clay components (<4 μm), fine silt (4−16 μm), medium silt (16−32 μm), coarse silt (32−64 μm), and sand (>64 μm) in the lake sediment were 20.32%, 40.13%, 22.86%, 10.55%, and 6.13%, respectively. The proportions of the environmentally sensitive components F1 (6.61−10.00 μm) and F2 (45.71−69.18 μm) in the sediment were extracted via the method of standard deviation versus grain size. The present study shows that, due to the increasing influence of human activities, changes in the content of the sensitive components of grain size cannot accurately reflect changes in lake water level, lake runoff, and even regional climate. Changes in sediment composition are instead related to changes in the intensity of human activities as reflected by the magnetic susceptibility of sediments, which shows significant correlation with human activity (r=0.870, P<0.01). It is observed that the increase in the magnetic susceptibility of the lake sediments is due to the increase in human activities in the watershed, which causes the transport of fine-grained detrital materials rich in magnetic materials into the lake. These research findings can provide an important reference for studies regarding paleoenvironment reconstruction on a long-term scale and have a clear scientific significance for understanding of the impact of human activities in the basin on lake environments.

Key words: Kazakhstan; Balkhash Lake; lacustrine sediments; grain size; environmental change